

Т. Н. ИСМАГАМБЕТОВА¹, М. Т. ГАБДУЛЛИН²¹ НИИЭТФ, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,
² ННЛОТ, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан)**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ**

Аннотация. В данной работе были исследованы термодинамические свойства частично-ионизованной плазмы. В качестве потенциала взаимодействия заряженной подсистемы был использован квазиклассический микропотенциал, который принимает во внимание квантовые эффекты дифракции и симметрии на коротких расстояниях [1]. Для взаимодействия заряженных частиц с атомами был использован эффективный потенциал взаимодействия [2]. Структурные свойства квазиклассической плазмы рассчитывались путем решения уравнения Орнштейна-Цернике в гиперцепном приближении. Таким образом, учитывается эффект экранирования. Система интегральных уравнений Орнштейна-Цернике была решена численными методами с привлечением комбинации методов Фурье и итерации. Термодинамические характеристики (внутренняя энергия и уравнение состояния) рассчитывались в зависимости от концентрации. Они были рассчитаны для частично-ионизованной водородной плазмы. Небольшое расхождение результатов можно объяснить увеличением концентрации атомов в системе.

В данной работе были исследованы термодинамические характеристики частично ионизованной водородной плазмы, состоящей из электронов, ионов и атомов при следующих параметрах концентрации и температуры: $n = n_e + \sum n_i + n_a = 10^{20} \div 10^{24} \text{ см}^{-3}$ и $T = 10^4 \div 10^6 \text{ К}$.

Через потенциал, учитывающий квантово-механические эффекты дифракции и симметрии [1] на малых расстояниях и эффект экранировки на больших расстояниях вследствие применения гиперцепного приближения при решении интегрального уравнения Орнштейна-Цернике [3] и были рассчитаны термодинамические характеристики:

$$\varphi_{\alpha\beta}(r) = \frac{e_\alpha e_\beta}{r} \left(1 - \tanh \left(\sqrt{2} \frac{\lambda_{\alpha\beta}^2}{a_B^2 + br^2} \right) e^{-\tanh \left(\sqrt{2} \frac{\lambda_{\alpha\beta}^2}{(a_B^2 + br^2)} \right)} \right) \left(1 - e^{-r/\lambda_{\alpha\beta}} \right) - \delta_{\alpha e} \delta_{\beta e} k_B T \ln \left(1 - \frac{1}{2} \exp \left(-\frac{r^2}{\lambda_{ee}^2} \right) \right), \quad (1)$$

где $b=0.033$, e_α, e_β – электрические заряды частиц сорта α и β , $\lambda_{\alpha\beta} = \hbar / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ – тепловая длина волны Де-Бройля, $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ – приведенная масса частиц сорта α и β .

Для взаимодействий заряженных частиц с атомами был использован эффективный потенциал взаимодействия [2]:

$$\Phi_{es}(r) = -\frac{e^2 \alpha_p}{r^4 (1 - \lambda_{ee}^2 / r_D^2)} (e^{-Br} (1 + Br) - e^{-Ar} (1 + Ar))^2, \quad (2)$$

где $B^2 = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}}{2\lambda_{\alpha\beta}^2}$, $A^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}}{2\lambda_{\alpha\beta}^2}$.

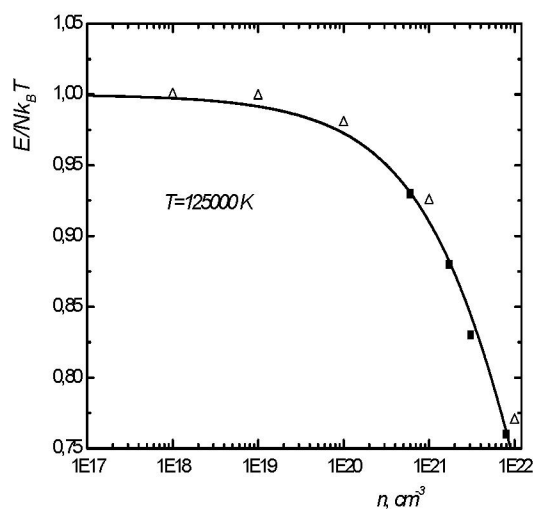
Внутренняя энергия и уравнение состояния плазмы:

$$E = E_{id} - \pi \sum_{\alpha=i,e} n_\alpha \sum_{\beta=i,e} n_\beta \int_0^\infty g_{\alpha\beta}(r) \Phi_{\alpha\beta}(r) r^2 dr, \quad (3)$$

$$P = P_{id} - \frac{2}{3} \pi \sum_{\alpha=i,e} n_\alpha \sum_{\beta=i,e} n_\beta \int_0^\infty \frac{\partial \Phi_{\alpha\beta}(r)}{\partial r} g_{\alpha\beta}(r) r^3 dr, \quad (4)$$

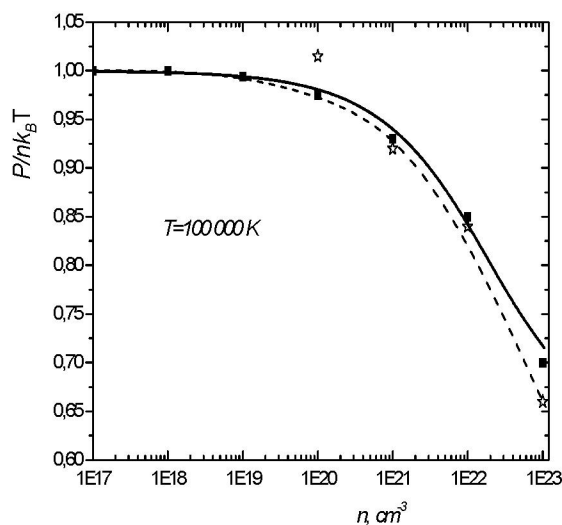
где N – число частиц в системе, $E_{id} = 3/2Nk_B T$ – внутренняя энергия идеальной плазмы, $P_{id} = nk_B T$ – давление идеальной плазмы.

На рисунке 1 представлена зависимость внутренней энергии от концентрации при температуре $T = 125\,000\text{ K}$ в сравнении с результатами других авторов. Сплошная линия – результаты данной работы, не закрашенные треугольники – поправки Хартри-Фока и Монрол-Варда [4], закрашенные квадратики – результаты моделирования Монте-Карло [5]. Незначительное расхождение результатов между собой можно объяснить повышением концентрации атомов в данной работе по сравнению с сильно ионизованной плазмой в вычислениях Монте-Карло.



— на основе потенциала (1),
 Δ – [4], \blacksquare – моделирование Монте-Карло [5].

Рисунок 1 – Внутренняя энергия частично ионизованной водородной плазмы при $T = 125\,000\text{ K}$



— на основе потенциала (1),
 \blacksquare – функции Грина [6],
 --- приближение Монтрола-Варда [7], \star – МД [8]

Рисунок 2 – Давление частично ионизованной водородной плазмы при $T = 100\,000\text{ K}$

На рисунке 2 проведено сравнение значений поправки на неидеальность к давлению в зависимости от плотности частиц при фиксированной температуре $T = 100\,000\text{ K}$ с результатами работ других авторов. Сплошной линией изображена наша кривая, основанная на потенциале (1), черными квадратами обозначены результаты использования метода функции Грина [6], пунктирной линией показано приближение Монрола-Варда [7], белыми пентаграммами представлены данные работы Кнаупа [8] (молекулярная динамика). Результаты данной работы достаточно хорошо согласуются с данными других приближений до $n = 10^{22}\text{ см}^{-3}$, далее появление концентрации атомов в системе приводит к завышению нашей кривой.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Zh. A. Moldabekov, T. S. Ramazanov, and K. N. Dzhumagulova. Contrib. Plasma Phys. 2012. № 52. P. 207.
- 2 L. David. Dover publications, Inc. 2002. P. 500.
- 3 T.S.Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, Yu.A. Omarbakiyev. Phys. Plasm. 2005. № 12. P. 092702.
- 4 W.D. Kraeft, D. Kremp, W. Ebeling, G. Röpke Berlin: Akademie-Verlag. 1986. P. 381.
- 5 V.S. Filinov, M. Bonitz, D. Kremp, W.D. Kraeft, W. Ebeling, P.R. Levashov, V.E. Fortov Contrib. Plasma Phys. 2001. № 41. 2. P. 135-138.
- 6 M. Knaup, P.G. Reinhard, C. Toepffer Contrib. Plasma Phys. 2001. № 41. P. 159.
- 7 B. Militzer, D. M. Ceperley Phys. Rev. E. 2001. № 63 P. 066404.
- 8 B. Militzer, D. M. Ceperley Phys. Rev. Lett. 2000. № 85 P. 1890-1893.

REFERENCES

- 1 L. David Dover publications, Inc., **2002**, 500 (in Eng.).
- 2 Zh. A. Moldabekov, T. S. Ramazanov, and K. N. Dzhumagulova Contrib. Plasma Phys., **2012**, 52, 207 (in Eng.).
- 3 T.S.Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, Yu.A. Omarbakiyev Phys. Plasm., **2005**, 12, 092702 (in Eng.).
- 4 W.D. Kraeft, D. Kremp, W. Ebeling, G. Röpke Berlin: Akademie Verlag, **1986**, 381 (in Eng.).
- 5 V.S. Filinov, M. Bonitz, D. Kremp, W.D. Kraeft, W. Ebeling, P.R. Levashov, V.E. Fortov Contrib. Plasma Phys., **2001**, 41, 2, 135-138 (in Eng.).
- 6 M. Knaup, P.G. Reinhard, C. Toepffer Contrib. Plasma Phys., **2001**, 41, 159 (in Eng.).
- 7 B. Militzer, D. M. Ceperley Phys. Rev. E., **2001**, 63, 066404 (in Eng.).
- 8 B. Militzer, D. M. Ceperley Phys. Rev. Lett., **2000**, 85, 1890-1893 (in Eng.).

Резюме

T. N. Ismagambetova¹, M.T. Fабдуллин²

¹ЭТФФЗИ, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан,
²АТҰНЗ, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан)

КВАЗИКЛАССИКАЛЫҚ ЖАРТЫЛАЙ ИОНДАЛҒАН
 СУТЕКТІ ПЛАЗМАНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Бұл жұмыста жартылай иондалған плазманың термодинамикалық қасиеттері зерттелген. Зарядталған жүйе бөліктерінің потенциалы ретінде кванттық әсердің дифракциясы мен қысқа қашықтықтағы симметрияны есепке алатын квазиклассикалық микропотенциал пайдаланылған. Квазиклассикалық плазманың құрылымдық қасиеттері гиперцептік жуықтауда Орнштейн-Церникенің теңдеуінің шешуі арқылы есептелген. Сол арқылы экрандалу құбылысы есептеледі. Термодинамикалық сипаттамалары (күй теңдеуі мен ішкі энергия) концентрация тәуелділігіне байланысты есептелген. Олар жартылай иондалған сутекті плазма үшін есептелген. Алынған нәтижелер басқа авторларының жұмыстарымен салыстырылды. Нәтиженің шағын алшақтығы жүйедегі атомдар концентрациясының көбеюімен түсіндірілуі мүмкін.

Summary

T. N. Ismagambetova¹, M. T. Gabdullin²

¹IETP, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,
²NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan)

THERMODYNAMIC PROPERTIES
 OF SEMICLASSICAL PARTIALLY IONIZED HYDROGEN PLASMA

In this work the semiclassical micropotentials taking into account the quantum-mechanical diffraction and symmetry effects were used. The effective interaction potential has been used for the interactions of charged particles with atoms. The structural properties of the semiclassical plasma are calculated by solving Ornstein-Zernike equation in HNC approximation. Thus, screening effect is taken into account. The thermodynamic characteristics (internal energy and equation of state) were calculated for a partially ionized hydrogen plasma. The obtained results were compared with other authors' works. Slight discrepancy between the results can be explained by an increase in the concentration of atoms in the system.